

Contraintes résiduelles dans les interconnexions submicroniques. Prise en compte des dimensions des lignes de cuivre par des microcapteurs embarqués

R. VAYRETTE^{a,b}, S. BLAYAC^b, C. RIVERO^a, K. INAL^b

^a STMicroelectronics, Zone industrielle de Rousset, 13106 ROUSSET cedex

^b ENSMSE-CMP département PS2, 880 route de Mimet, 13541 GARDANNE cedex

Résumé :

Des capteurs embarqués ont été élaborés pour évaluer la contrainte résiduelle dans les interconnexions submicroniques de cuivre. Ils permettent de suivre l'évolution de la contrainte avec la diminution de la largeur des interconnexions. Une augmentation de la contrainte de 290 à 850 MPa est observée lorsque la largeur de ligne est réduite de 2 à 0,25 μm .

Abstract :

Embedded sensors have been elaborated to evaluate residual stress in submicron copper interconnects. These sensors allow studying the stress as the interconnect width decreases. A stress increase from 290 up to 850 MPa is observed with the line width reduction from 2 down to 0,25 μm .

Mots clefs : contrainte résiduelle, capteur embarqué, interconnexion, cuivre, procédé damascene.

1 Introduction

L'augmentation toujours croissante des fonctionnalités et des capacités des composants de la microélectronique impose une réduction constante des dimensions des dispositifs. Cette diminution de taille repousse toujours plus loin les limites des propriétés mécaniques des matériaux utilisés à la fois dans la partie active mais également dans les interconnexions. Ainsi, la maîtrise de l'état de contrainte des interconnexions des circuits intégrés est un sujet clé en matière d'industrialisation et de fiabilité [1]. Les interconnexions des circuits intégrés sont aujourd'hui en cuivre et réalisées par le biais du procédé damascene, dans lequel le cuivre est électrodéposé à température ambiante puis recuit. Ce recuit de recristallisation constitue la principale source d'évolution microstructurale et également de génération de contraintes [2]. Les contraintes dans les films minces et dans des motifs de type « ligne » ont été déterminées par différentes méthodes telles que la diffraction des rayons X (DRX) [3][4], les mesures de courbures [5] mais également par le biais de capteurs passifs directement intégrés dans le produit [6][7][8]. Les microcapteurs pivotants développés ces dernières années permettent la détermination de ces contraintes dans des structures de dimensions de l'ordre de quelques microns [6][7][9]. Cependant, les interconnexions de cuivre atteignent aujourd'hui des dimensions latérales inférieures à la centaine de nanomètres. Pour permettre la détermination des niveaux de contrainte à cette échelle submicronique, de nouvelles structures pivotantes ont été développées. L'approche utilisée pour extraire la contrainte résiduelle pour différentes largeurs de ligne est présentée dans la suite. Des débuts d'interprétation seront fournis pour expliquer les résultats obtenus.

2 Description du capteur

Les capteurs pivotants sont composés de deux bras d'expansion connectés à un pointeur central, formant une croix asymétrique (figure 1). Initialement, ils sont encapsulés dans des diélectriques et présentent un état de contrainte résiduelle. Lorsqu'ils sont libérés des encapsulants, les deux bras d'expansion relaxent la contrainte et induisent un couple de force sur le pointeur central qui tourne jusqu'à atteindre sa position d'équilibre (figure 1). Ainsi, pour une largeur et une longueur de bras fixée, différents espacements de bras engendrent différentes déviations du pointeur central. Le niveau de contrainte résiduelle initial est alors évalué en reproduisant les déviations expérimentales par le biais d'un modèle analytique décrivant l'état

mécanique d'équilibre des structures après libération. Le signe de la contrainte est défini quand à lui par le sens de rotation du pointeur. Par exemple, pour une contrainte résiduelle initiale en tension, le pointeur tournera dans le sens horaire (figure 1).

La fabrication des capteurs suit le procédé « Complementary Metal Oxide Semiconductor » (CMOS) et donc le procédé damascene qui consiste à remplir par un métal les tranchées gravées dans un diélectrique. Le diélectrique est un film de matériau à faible constante diélectrique déposé par voie chimique en phase vapeur (CVD). Après la gravure des tranchées, une bicouche de Ta et TaN d'une épaisseur de 25 nm est déposée par voie physique en phase vapeur (PVD). Ensuite, une sous-couche de 120 nm de cuivre est déposée par PVD pour permettre le dépôt électrochimique en phase liquide de 2 μm de cuivre à température ambiante. Après un recuit à 400 °C pendant 30 minutes dans une atmosphère 100% N_2 , la surépaisseur de cuivre est enlevée au moyen d'un polissage mécano chimique (CMP) aboutissant à des lignes de cuivre de 250 nm d'épaisseur. Finalement, une couche protectrice de SiCN de 30 nm d'épaisseur est déposée par CVD pour éviter d'oxyder le cuivre. L'empilement final est dessiné figure 1.

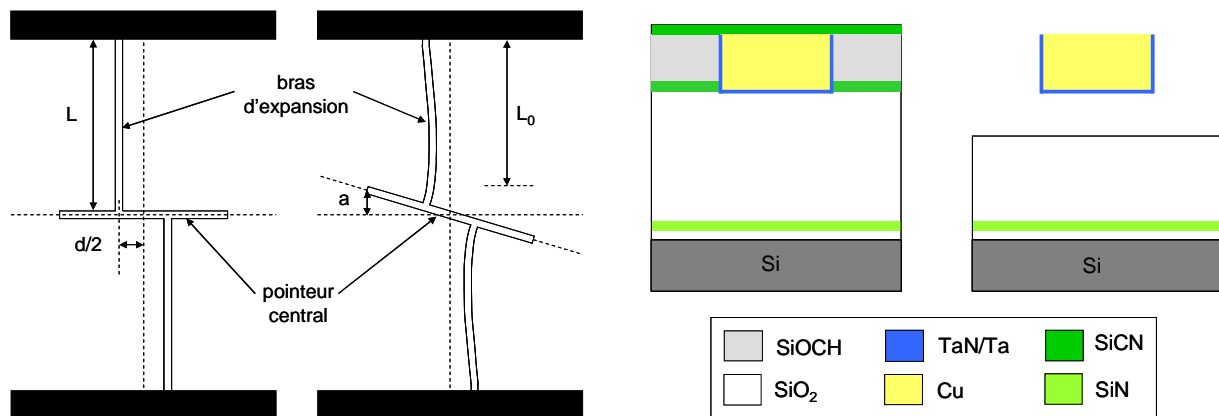


FIG. 1 – Schémas de la vue de dessus (gauche) et de la coupe transversale (droite) du capteur avant et après libération. L est la longueur de bras avant libération, L_0 la longueur de bras totalement relaxée, d l'espacement entre les bras et a la déviation du pointeur.

Pour libérer la structure, deux étapes sont nécessaires. D'abord, le SiCN et le SiOCH sont gravés à l'aide de plasmas. Ensuite les capteurs sont libérés des couches inférieures par gravure humide au HF (50%) pendant 5 secondes. La déviation du pointeur central est mesurée au moyen d'observations par microscopie électronique à balayage (MEB).

3 Etude mécanique du capteur

L'accroche des bras au pointeur central n'étant pas un pivot parfait, les bras subissent un moment de flexion dans le plan en réponse à la rotation du pointeur central (figure 1) [7]. La contrainte résiduelle contenue dans les bras n'est donc pas totalement relaxée. Pour réduire ce moment de flexion et ainsi augmenter la rotation du pointeur, une nouvelle configuration d'accroche est proposée (figure 2). D'une part, la précision des capteurs est améliorée et d'autre part l'étude de l'impact de la largeur de ligne sur la contrainte est possible sans changer les autres dimensions des capteurs telles que la longueur de bras et du pointeur central.

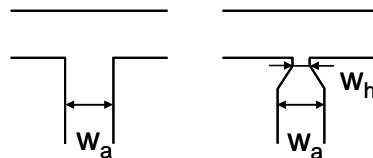


FIG. 2 – Schémas des deux configurations d'accroche des bras sur le pointeur central : classique (gauche) et nouvelle (droite).

Pour décrire l'état mécanique d'équilibre des capteurs quelque soit la configuration de l'accroche des bras sur le pointeur central, un nouveau modèle analytique dérivé de la référence 7 est proposé (1). Il pondère le terme correspondant au moment de flexion des bras par un coefficient α égal au rapport de la largeur du bras et de l'accroche ($\alpha = w_b/w_a$). Dans ce modèle, le comportement mécanique du capteur est décrit à partir d'une approche élastique isotrope. De plus, l'état de contrainte des bras est considéré uniaxial dans la

direction longitudinale des bras. La contrainte évaluée correspond donc à la contrainte résiduelle longitudinale moyenne.

$$a = \frac{d \times L \times L_0 (L - L_0)}{d^2 (2L - L_0) + \frac{4}{3} w_a^2 \times L_0 \times \alpha} \quad \text{avec} \quad L_0 = \frac{L}{1 + \frac{\sigma}{E}} \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{w_h}{w_a} \quad (1)$$

σ est la contrainte résiduelle moyenne longitudinale, E le module d'Young, les paramètres géométriques sont définis sur les figures 1 et 2.

La figure 3 donne une comparaison des déviations du pointeur central prédites par le modèle analytique pour des capteurs de 0,5 μm de largeur de bras avec deux configurations d'accroche différentes et le même niveau de contrainte résiduelle initiale (500 MPa). Le module d'Young macroscopique du cuivre est pris égal à 125 GPa.

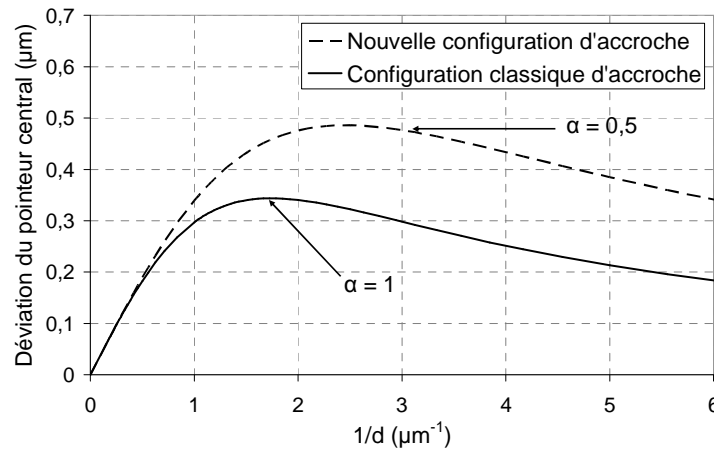


FIG. 3 – Déviations du pointeur central prédites par le modèle analytique pour des capteurs de 0,5 μm de largeur et 10 μm de longueur de bras avec une contrainte résiduelle de 500 MPa.

Comme prévu, la nouvelle configuration d'accroche permet de plus grandes déviations de pointeurs comparées à celles obtenues avec des accroches classiques. Ceci est particulièrement vrai pour les faibles espacements de bras où le moment de flexion est le plus fort.

4 Procédure expérimentale

L'impact de la réduction des dimensions des lignes de cuivre sur leurs propriétés mécaniques et plus particulièrement sur leurs niveaux de contraintes résiduelles est étudié dans ce travail. Pour ce faire, une série de structures basées sur le principe des capteurs pivotants est fabriquée. Ces capteurs permettent d'investir des largeurs de ligne de plusieurs microns à quelques centaines de nanomètre. Trois largeurs de bras différentes ont été définies : 2, 0,5 et 0,25 μm . Il faut noter que les capteurs de 2 μm de largeur de bras sont identiques aux structures utilisées dans la référence 7 et ont une configuration d'accroche des bras sur le pointeur central classique.

Comme il apparaît dans l'équation 1, pour diminuer au mieux le moment de flexion des bras, la largeur d'accroche doit être la plus petite possible. Par conséquent, la limite inférieure est fixée par les tailles caractéristiques des interconnexions de la technologie 90 nm des circuits intégrés. D'un autre côté, les accroches doivent être robustes face au procédé de libération et aux déformations occasionnées par la rotation du pointeur central. Ainsi, la largeur d'accroche doit être supérieure à la limite inférieure de la taille caractéristique des interconnexions de la technologie 90 nm et est choisie à 0,25 μm . De ce fait, seulement les capteurs ayant une largeur de bras de 0,5 μm ont une nouvelle configuration d'accroche des bras sur le pointeur central (figure 4).

Une série de sept capteurs ayant chacun des espacements de bras différents ont été fabriqués pour chaque largeur de bras (soit 21 capteurs). Les dimensions des capteurs sont décrites table 1.

Type	w_a	w_h	L	d
A	2	2	100	De 3 à 14
B	0,5	0,25	10	De 0,2 à 2
C	0,25	0,25	10	De 0,2 à 2

Table 1 : Dimensions des capteurs en micron.

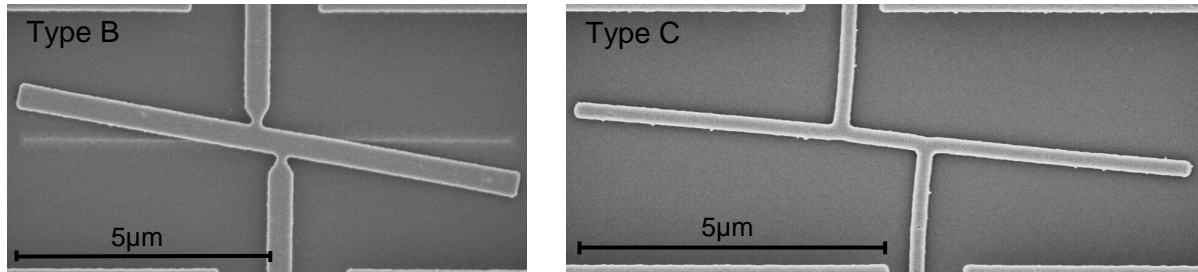


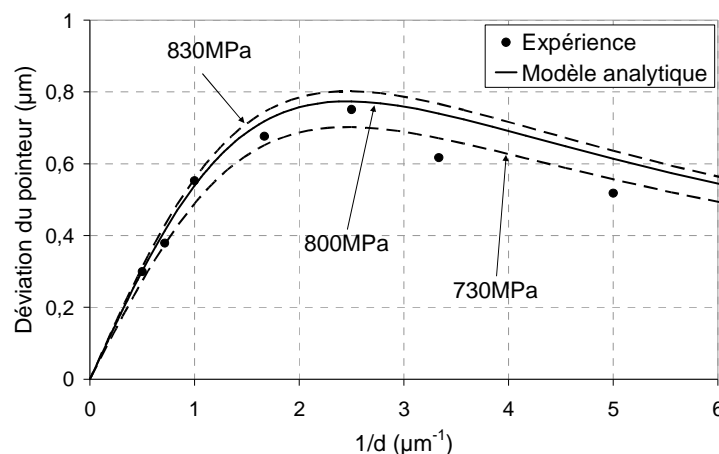
FIG. 4 – Observations MEB des capteurs de type B et C après libération.

Afin d'avoir une valeur de référence, l'état de contrainte résiduelle d'un film mince de cuivre ayant la même épaisseur que les capteurs réalisés (0,25 μm) est déterminée avec l'équation de Stoney [10] en utilisant le changement de courbure de la plaquette de silicium sur lequel il est déposé. La courbure de la plaquette de silicium est mesurée avant le dépôt de cuivre PVD et après l'étape de recuit.

5 Etude de la contrainte résiduelle en fonction de la largeur de ligne

5.1 Estimation de la contrainte

Après libération de la structure, la déviation du pointeur est mesurée à l'aide d'une observation au MEB. L'erreur de mesure induite par la précision de l'observation au MEB génère une incertitude faible de ± 20 MPa sur l'estimation de la contrainte. Cependant, la contrainte est extraite à partir des mesures de la déviation du pointeur central de plusieurs capteurs ayant des espacements de bras différents. Ainsi, l'erreur commise avec le modèle analytique sur l'extraction de la contrainte est évaluée à partir des points expérimentaux donnant la valeur de contraintes la plus faible et la plus grande. Cette approche a été appliquée aux déviations de pointeurs expérimentales correspondant aux grands espacements de bras qui ont une dépendance linéaire en $1/d$ (figure 5). Les erreurs de mesures sont les plus importantes dans ce domaine car les déviations de pointeurs sont les plus faibles.

FIG. 5 – Extraction de la contrainte résiduelle pour des capteurs dont la largeur de bras est de 0,5 μm avec une nouvelle forme d'accroche (type B).

La rotation du pointeur dans le sens inverse du sens horaire observée figure 4 est significative d'une contrainte résiduelle en tension dans les bras. Elle est de 800 MPa avec une limite inférieure à 730 MPa et une limite supérieure à 830 MPa. Ainsi, la contrainte résiduelle est de 800 \pm 70 MPa. Les deux points en

dehors du domaine défini par la limite inférieure et supérieure correspondent aux petits espacements de bras ($1/d > 3$) où se produisent probablement des déformations plastiques locales au niveau des accroches.

5.2 Etude de la contrainte en fonction de la largeur des lignes de cuivre

Les niveaux de contraintes résiduelles déterminés à partir des déviations expérimentales de pointeurs et des données de courbures de plaquettes de silicium sont tracés figure 6. La contrainte résiduelle est de 250 MPa pour le film et de 290 MPa pour les lignes de deux microns de large. En ce qui concerne les lignes de 0,5 et 0,25 μm de large, elle est respectivement de 800 et 850 MPa. Cette tendance est en accord avec les données de la littérature [3][4]. Par exemple, des mesures en DRX avec un rayonnement synchrotron sur des lignes de 0,25 à 1 μm de large et 0,6 μm d'épaisseur ont mis en évidence une contrainte résiduelle longitudinale moyenne de 700 MPa [3]. Ceci confirme que les capteurs sont performants et fiables. De plus, ils fournissent une estimation de la contrainte résiduelle simple, rapide et bas coût contrairement aux mesures DRX avec un rayonnement synchrotron.

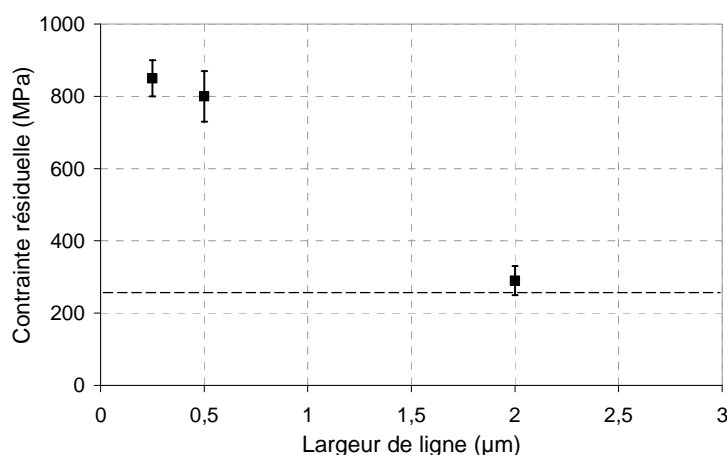


FIG. 6 – Contrainte résiduelle en fonction de la largeur de ligne. La ligne rouge en pointillé représente la contrainte résiduelle moyenne du film de cuivre.

L'augmentation de la contrainte résiduelle moyenne avec la réduction de la largeur de ligne observée figure 6 est caractéristique d'une augmentation de la limite élastique et d'un fort ralentissement des mécanismes de fluage (diffusion aux joints de grains par exemple) durant le recuit de recristallisation. En effet, les lignes submicroniques ont un comportement purement élastique durant la redescente en température tandis que les films présentent un comportement élasto-plastique (fluage et glissement de dislocations) [3][4].

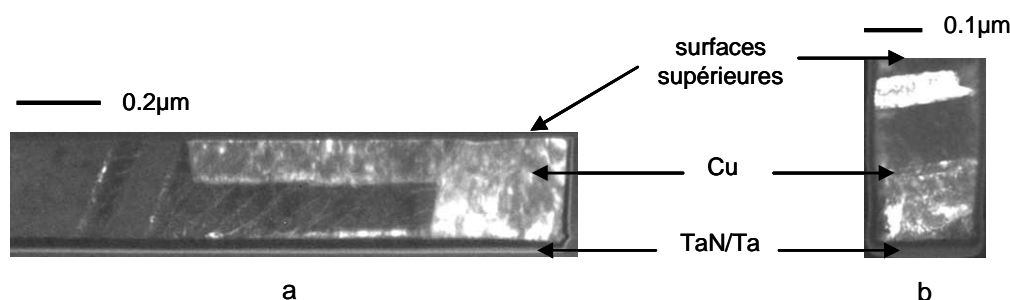


FIG. 7 – Observations des coupes transverses de lignes de cuivre d'une largeur de (a) 2 et (b) 0,18 μm en champ sombre au microscope électronique en transmission (MET).

La figure 7 montre une différence de microstructure granulaire entre les lignes de 2 et 0,18 μm de large. La plus petite ligne est remplie par un seul grain dans la largeur et plusieurs grains dans l'épaisseur. Dans le cas de la ligne de 2 μm de large, plusieurs grains apparaissent dans la largeur et un ou deux grains dans l'épaisseur. En plus, des modifications d'orientation cristalline [4] et de la restriction du glissement des dislocations [5], la diminution de la largeur de ligne mène aussi à une réduction de la taille moyenne des grains. Ces observations pourraient expliquer l'augmentation de la limite élastique et ainsi de la contrainte

résiduelle avec la réduction de largeur de ligne.

6 Conclusion

Les contraintes résiduelles longitudinales moyennes des interconnexions de cuivre damascene dans un domaine de largeur de 0,25 à 2 μm ont été étudiées au moyen de capteurs pivotants. Une nouvelle configuration d'accroche des bras sur le pointeur central a été réalisée pour des structures de 0,5 μm de largeur de bras améliorant la précision des capteurs pour l'extraction de la contrainte. Elle permet également d'élaborer des capteurs avec différentes largeurs de bras tout en conservant les autres dimensions et donc d'étudier l'évolution de la contrainte avec la réduction des dimensions latérales. Un nouveau modèle de l'état mécanique d'équilibre du capteur a également été validé. Pour des largeurs de 2, 0,5 et 0,25 μm il est trouvé des contraintes de 290, 800 et 850 MPa. Cette augmentation du niveau de contrainte avec la réduction de la largeur de ligne est en accord avec la littérature indiquant de forts niveaux de contraintes (≥ 800 MPa) dans les structures les plus petites ($< 0,5 \mu\text{m}$). La sensibilité de ce type de capteur embarqué pour des procédés CMOS est ainsi démontrée, constituant une structure de test performante et fiable pour évaluer le niveau de contrainte des interconnexions. De plus, ces capteurs sont faciles à employer, rapides à analyser et peu coûteux. Des améliorations sont prévues pour mesurer la résistivité électrique du cuivre. Cela permettra d'avoir sur le même capteur, l'état de contrainte et la taille moyenne des grains [11][12]. Dans le but de mieux connaître l'orientation cristalline des grains en fonction de la largeur de ligne et les contraintes locales, une étude en microdiffraction des rayons X est menée sur ces capteurs.

Références

- [1] Gardner D. S., Homogeneous and layered films of aluminium/silicon with titanium for multilevel interconnects, 2nd Int. IEEE VLSI Multilevel Interconnection Conf., 102-113, 1985.
- [2] Nix W. D., Mechanical properties of thin films, Metall. Trans., 20A, 2217-2245, 1989.
- [3] Rhee S., Du Y., Ho P. S., Thermal stress characteristics of Cu/oxide and Cu/low k submicron interconnect structures, J. Appl. Phys., 93 7, 3926-3933, 2003.
- [4] Baldacci A., Rivero C., Gergaud P., Grégoire M., Sicardy O., Bostrom O., Boivin P., Micha J. S., Thomas O., Stress in copper blanket films and damascene lines : measurements and finite element analysis, ESSDERC, 105-108, 2004.
- [5] Kobrinsky M. J., Thompson C. V., Gross M. E., Diffusional creep in damascene Cu lines, J. Appl. Phys., 89 1, 91-98, 2001.
- [6] Horsfall A. B., dos Santos J. M. M., Soare S. M., Wright N. G., O'Neill A. G., Bull S. J., Walton A. J., Gundlach A. M., M. Stevenson J. T., Direct measurement of residual stress in integrated circuit interconnect features, Microelectronics Reliability, 43, 1797-1801, 2003.
- [7] Kasbari M., Rivero C., Blayac S., Cacho F., Bostrom O., Fortunier R., Direct local strain measurement in damascene interconnects, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 990, 2007, B07-06.
- [8] Delamare R., Blayac S., Kasbari M., Inal K., Rivero C., Mechanical stress sensors for copper damascene interconnects, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 1052, 2008, DD03-01.
- [9] Zhang X., Zhang T., Zohar Y., Measurements of residual stresses in thin films using micro-rotating-structures, Thin Solid Films, 335, 97-105, 1998.
- [10] Stoney G. G., The tension of metallic films deposited by electrolysis, Proc. R. Soc. London Ser., A 82, 172, 1909.
- [11] Mayadas A. F. and Shatzkes M., Electrical-resistivity model for polycrystalline films: the case of arbitrary reflexion at external surfaces, Phys. Rev. B 1, 1382, 1970.
- [12] Carreau V., Maîtrejean S., Verdier M., Bréchet Y., Roule A., Toffoli A., Delaye V., Passemar G., Evolution of Cu microstructure and resistivity during thermal treatment of damascene line: influence of line width and temperature, Microelec. Eng., 84, 2723-2728, 2007.